

LES CONCRETIONS CARBONATEES DES GROTTES : APERÇU SYNTHETIQUE

par

Michel GEWELT^{1,2} et Camille EK¹

(4 figures)

RESUME.- Une revue synthétique des recherches des vingt dernières années permet de dégager les tendances actuelles et les perspectives de l'étude des concrétions les plus typiques des grottes : celles qui sont constituées de carbonate de calcium.

Parmi la grande variété des recherches recensées, l'accent est mis sur la composition des concrétions, leur mode de formation, leur âge, et sur les implications paléoclimatiques qui en découlent. Les principaux résultats sont le fait de l'avènement des méthodes isotopiques et radiométriques qui, alliées à d'autres disciplines, comme par exemple la palynologie et la téphrostratigraphie, font des concrétions stalagmitiques un matériau de choix pour l'étude du Quaternaire.

A côté des apports géomorphologiques (comprenant des données nouvelles sur la vitesse d'enfoncement du réseau hydrographique en Belgique), la multiplication des datations des concrétions stalagmitiques permet également, par traitement statistique, d'étudier la répartition dans le temps du concrétionnement et sa relation avec les paléoclimats. Deux nouvelles courbes de fréquence des datations $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ de concrétions sont présentées.

ABSTRACT.- Speleothems : an overview. A synthetic overview of the scientific work on calcium carbonate cave deposits (dripstones and flowstones) over the last twenty years is carried out. More particularly, recent studies on speleothems composition, growth, age and paleoclimatic environment are examined.

Main new results are in relation with the development of isotopic and radiometric dating methods which together with other research fields like palynology and tephrostratigraphy make speleothem a first choice material for the study of Late and Upper Quaternary.

Beside geomorphological contributions — including Belgian results on maximum rates of valleys entrenchment and deepening — increasing number of dates allow for statistical speleothem repartition studies which could be related with paleoclimates. Two new frequency curves of U-series ages data of speleothems are presented.

¹ Laboratoire de Géomorphologie et de Géologie du Quaternaire, Université de Liège, Place du Vingt-Août, 7, (A 1), B - 4000 Liège (Belgique).

² Laboratoire de Géographie physique, Université de Liège et CEN/SCK, Section «Mesures des faibles Radioactivités», B - 2400 Mol (Belgique).

I.- INTRODUCTION

Les grottes peuvent contenir des remplissages chimiques, détritiques ou organiques, qui occupent parfois une portion importante des cavités. Leur présence influe alors souvent sur l'évolution ultérieure de la cavité. Celle-ci peut même être fossilisée, lorsque le remplissage la comble tout entière.

Parmi les dépôts des grottes, les concrétions carbonatées sont certes l'élément le plus caractéristique, et elles comprennent les formes les plus célèbres de remplissage. C'est à ces dépôts de précipitation qu'est consacrée la présente contribution. Celle-ci est en partie basée sur un exposé fait par l'un d'entre nous aux Journées du Karst en Euskadi (Ek, 1986). Elle s'appuie largement aussi sur une revue de la littérature préparée en vue d'une thèse de doctorat (Gewelt, en préparation). De cette revue, qui comporte plus de 220 titres, essentiellement sur les datations radiométriques des concrétions, nous avons dû sélectionner, de façon parfois arbitraire, une partie seulement des références.

Il ne pouvait être question, dans l'espace qui nous est ici imparti, de faire une revue historique complète de la question. Placés devant la nécessité d'un choix, nous avons décidé de ne traiter que des progrès réalisés durant les vingt dernières années ; on ne trouvera donc que très exceptionnellement des titres antérieurs à 1967. Les travaux plus anciens se trouvent abondamment cités dans les ouvrages généraux de Jennings (1971 et 1983), Sweeting (1972), Ford & Cullingford (1976), Jakucs (1977), Bögli (1980) et Hill & Forti (1986), par exemple.

II.- COMPOSITION, MODES DE FORMATION ET FORMES DES CONCRETIONS CARBONATEES

Les concrétions carbonatées sont certes les dépôts chimiques les plus abondants et les formes les plus célèbres des remplissages des grottes. Avec Monroe (1970), Hill (1976) et White (*in* Ford & Cullingford, 1976), nous pouvons définir les concrétions comme des dépôts minéraux secondaires formés en grotte.

La composition chimique et la nature minéralogique des concrétions des grottes sont extrêmement variables. On trouvera une liste de 69 minéraux dans Moore (1970), une liste de 76 minéraux dans Hill

(1976), tandis que Bögli (1980) en cite 102 et que Hill & Forti (1986) en citent plus encore ! Mais ces listes incluent des chlorures, des oxydes et hydroxydes, des nitrates, des phosphates, des silicates, des sulfates, etc. Ces minéraux sont en général beaucoup moins abondants que les carbonates, dont Hill (1976) cite 9 variétés (plus le carbonate-apatite), Hill & Forti (1986) 10 variétés (dont la vatérite qui n'est pas «naturelle» en grotte) et Bögli (1980), 18 variétés. Parmi toutes ces variétés, cependant, la calcite (dans la plupart des formations) puis les hydrocalcites (dont le lait de lune, «mondmilch») et l'aragonite (souvent sous forme de minces aiguilles) sont les minéraux carbonatés les plus abondants dans les grottes. Ces minéraux sont des carbonates de calcium, et il n'est pas étonnant qu'ils soient les plus représentés, la roche calcaire ayant essentiellement la même composition chimique en général.

Toutefois, les causes qui font que le carbonate de calcium précipite sous l'une ou l'autre forme ne sont pas définitivement établies. Ainsi, par exemple, on a cru successivement que la précipitation d'aragonite au lieu de calcite était liée au degré d'alcalinité du milieu, puis à la température plus élevée, ensuite à la présence de certains oligo-éléments, et Folk & Assereto (1976) attribuent enfin, probablement dans tous les cas, disent-ils, la précipitation d'aragonite à la présence dans l'eau de magnésium en si grande abondance que le rapport Mg/Ca serait toujours supérieur à 2.

Le mode de formation des concrétions carbonatées est directement lié au processus de la dissolution. Les eaux de percolation corrodent le calcaire de la roche encaissante, généralement dans des fissures et conduits situés entre les points de pénétration de l'eau et les cavités sous-jacentes. Le carbonate de calcium passé en solution reprécipite parfois lorsque l'eau arrive dans une cavité un peu importante. Cette précipitation peut être due à l'évaporation, mais le plus souvent à l'évasion du CO₂ des solutions contenant les sels dissous (Roques, 1967 ; Girou, 1970 ; Thrailkill, 1970 ; Ek & Roques, 1972 ; Ek, 1973). La variation des pressions de CO₂ qui engendre la précipitation a parfois un caractère saisonnier (Ek & Gewalt, 1985). La couverture végétale et ses variations ont aussi une influence : Jakucs (1977) a montré que sous un sol déboisé et, à la suite de cela, dénudé par l'érosion, le débit des stalactites est beaucoup plus irrégulier que dans une grotte située sous un terrain à sol humique riche et épais (fig. 1).

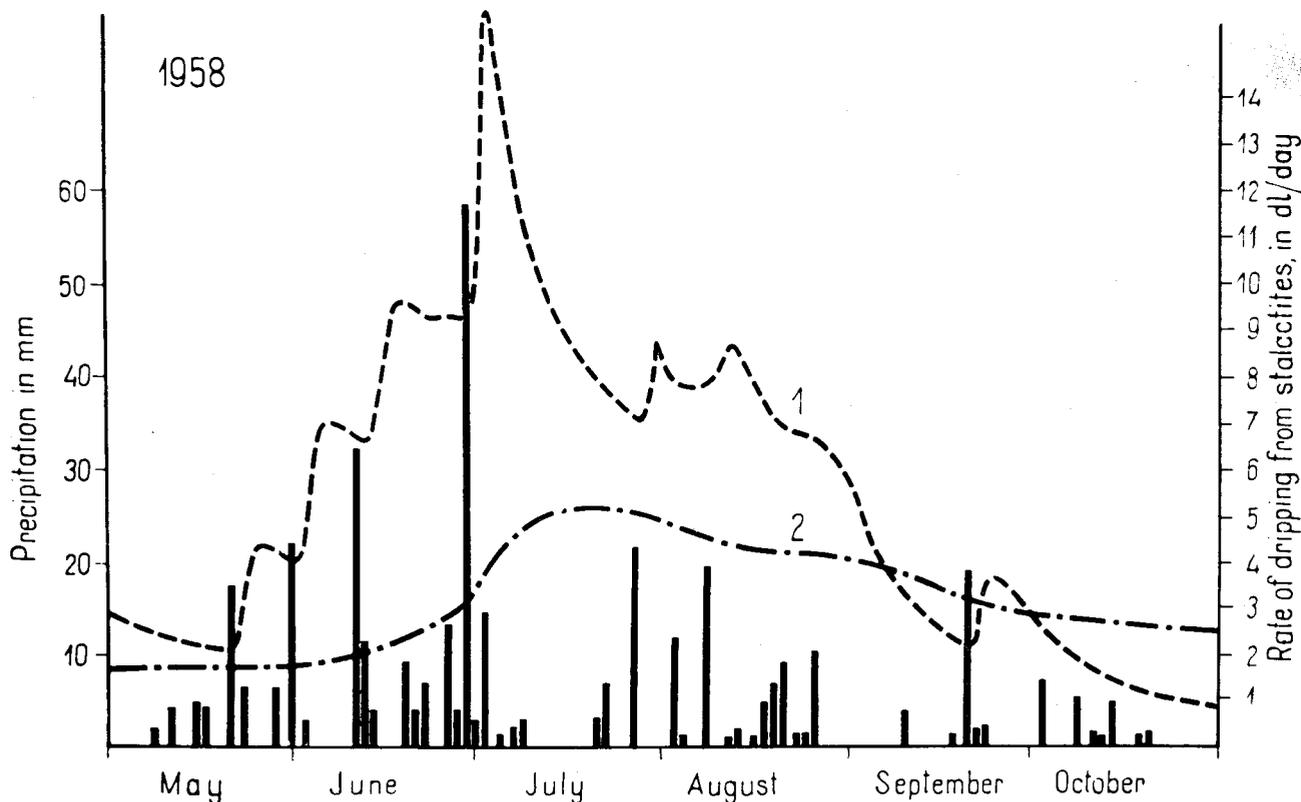


Fig. 1.- Différences entre le débit de stalactites sous-jacentes à un karst dénudé (trait 1) et un karst couvert d'un sol épais et riche en humus, sous forêt (trait 2). L'histogramme montre les précipitations durant six mois de 1958.

1. stalactite 3 de la Salle des Colonnes, grotte de Baradla ; 2. stalactite 4 de la grotte Béke. (d'après Jakucs, 1977, p. 204).

La cinétique de la précipitation a été récemment étudiée par Dreybrodt (1981), qui a calculé des vitesses de croissance théoriques des stalagmites, tandis que Kendall & Broughton (1978) ont tenté d'expliquer pourquoi la calcite colonnaire des concrétions aurait remplacé une calcite aciculaire originelle, plus favorable à l'écoulement de l'eau à la surface des concrétions en train de croître. On consultera aussi à ce sujet Broughton (1983, a, b et c).

Enfin, récemment, Dreybrodt (1982), par le calcul, et Atkinson (1983), par des observations et des mesures, ont établi et affirmé catégoriquement que les concrétions peuvent croître de façon notable sans intervention de CO_2 d'origine organique, donc durant les périodes glaciaires ou dans des régions sans végétation.

Les formes des concrétions ont été beaucoup étudiées dans des travaux déjà anciens. On trouvera d'intéressantes mises au point récentes entre autres dans Franke (1965 et 1971), Gams (1968), Curl (1972 et 1973), White (*in* : Ford & Cullingford, 1976), Bögli (1980), Bleahu (1982). Ces deux derniers auteurs classent les concrétions comme suit :

- concrétions liées à la percolation, «*dripstones*» (stalactites, draperies, stalagmites, ...);
- concrétions liées à l'écoulement, «*flowstones*» (planchers, coulées, ...);

- dépôts de gours (barrages et fonds de gours) ;
- excentriques et autres formations liées à la capillarité ;
- perles des cavernes ;
- lait de lune, «*mondmilch*».

Hill (1976), qui donne un catalogue alphabétique de 28 formes, ne les classe pas, mais illustre sa liste de 60 photographies.

III.- COULEUR DES CONCRETIONS

En ce qui concerne la couleur des concrétions, celle-ci a été souvent liée à la présence de cations déterminés. Jakucs (1977, p. 206) insiste sur l'influence du sol et de son érosion sur la couleur des concrétions : en Hongrie, le déboisement tend à colorer les stalactites en rouge (érosion et transport de *terra rossa*).

En 1967 déjà, Quinlan & Traverse avaient montré que la couleur brune de certains revêtements des parois de Mammoth Cave (Kentucky) était due à des humates provenant d'accumulations superficielles situées au-dessus de la grotte. Gascoyne (1977 a et c) conclut aussi, de l'analyse de 24 concrétions, que les composés organiques et probablement aussi la structure cristalline peuvent influencer la couleur, du fait qu'il n'y a nulle relation directe et simple entre

celle-ci et la composition en éléments en traces. White (1980 et 1981) confirme cette conclusion et avance que les colorations brunes ou jaunes des concrétions ne sont pas dues au fer, mais à des pigments organiques «peut-être des acides humiques et fulviques». En 1985, White *et al.*, décrivent, dans une grotte de Pennsylvanie, des concrétions bleues (essentiellement de l'allophane), brunes (oxyde de fer, non cristallisé à l'échelle de la diffraction X) et noires (oxydes de manganèse).

Enfin, dans leur magnifique étude des minéraux des grottes, Hill & Forti (1986), qui décrivent plusieurs minéraux organiques présents dans les grottes, et fournissent une riche bibliographie sur l'étude des couleurs des concrétions, concluent que la complexité de l'étude de la relation entre couleur et composition provient de ce que la coloration peut être liée soit à des ions métalliques en solution solide dans le réseau de la calcite, soit à des pigments concentrés entre les cristaux, soit encore à des impuretés organiques. Mais les propriétés cristallines, les états d'oxydation d'ions métalliques et même des bactéries pourraient avoir des influences sur la teinte des concrétions. Dans le même domaine encore, Ek & Gewalt (1986) publient des analyses de la composition cationique de concrétions colorées, et, dans une recherche encore inédite, notent que la calcite peut rester blanche malgré une teneur en carbone organique de 5 700 ppm, alors que des concrétions contenant moins du tiers de cette concentration en carbone organique peuvent être rouges, pour autant qu'elles contiennent un peu de fer (25 ppm pouvant suffire). Parmi les 34 concrétions analysées dans ce travail inédit, la plus riche en manganèse (7 200 ppm) est aussi la plus riche en carbone organique (12 800 ppm), ce qui confirme le rapport supposé entre le manganèse et les micro-organismes dans certaines concrétions sombres.

IV.- LA DATATION DES CONCRETIONS

Les découvertes récentes les plus importantes concernant les concrétions sont relatives à leur âge et aux climats sous lesquels elles sont formées. Ces progrès remarquables sont dus essentiellement à l'apport des méthodes radiométriques et isotopiques.

A.- LE CARBONE 14

La datation par le ^{14}C est la première méthode de datation radiométrique à avoir été appliquée aux

concrétions. Après plusieurs travaux de pionniers durant les années 50, la méthode prit son essor en 1966 avec la publication par Franke et par Geyh & Schillat d'une trentaine d'analyses ^{14}C de concrétions de grottes autrichiennes et allemandes. L'année suivante, Franke (1967) présente 29 datations (réalisées par les laboratoires de Hanovre et de Heidelberg) et Labeyrie *et al.* (1967) en publient 5, faites dans une même concrétion de l'Aven d'Orgnac (Ardèche, France). Ces trois travaux montrent déjà combien l'Holocène est favorable à la croissance des concrétions. Ceci se confirme rapidement et bientôt 54 datations permettent à Geyh & Franke (1970) de préciser la quasi-absence de concrétionnement en Europe centrale entre 20 000 et 12 600 ans B.P. et la lenteur du concrétionnement entre 35 000 et 20 000 ans B.P. La même année, paraît un remarquable travail de Hendy (1970), proposant une méthode originale d'estimation de l'activité initiale du ^{14}C et fournissant 21 datations dans des concrétions. A partir de ce moment, les travaux se multiplient sur tous les continents : de 1971 à 1982, nous avons recensé 25 publications.

En 1983, un travail de Gascoyne & Nelson donne six datations de concrétions par ^{14}C comparées aux âges $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. Il s'agit de concrétions formées dans une grotte sous un glacier et cette situation spéciale donne lieu à des problèmes particuliers — notamment en ce qui concerne l'origine du CO_2 . A peu près simultanément, Vogel (1983) compare des datations ^{14}C et $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dans une stalagmite d'Afrique du Sud, en calibrant les âges ^{14}C avec la courbe de Suess (1970).

Gewelt (1984 et 1985) fait les premières publications de ses datations dans des concrétions de grottes belges. Une soixantaine de datations ^{14}C , dont certaines sont comparées aux âges $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ obtenus par le même auteur, montrent la vigueur du concrétionnement postglaciaire holocène, mais aussi la grande variabilité des vitesses de croissance des concrétions.

Les données ultérieures (Gewelt, 1986 et 1987) confirment la quasi-absence de concrétionnement pendant le stade isotopique 2, ainsi que le montrent les 82 datations ^{14}C rassemblées dans la figure 2. La reprise du concrétionnement à l'Holocène se marque nettement à partir de 10 ka.

Datations C-14 de concrétions Classes de 200 ans

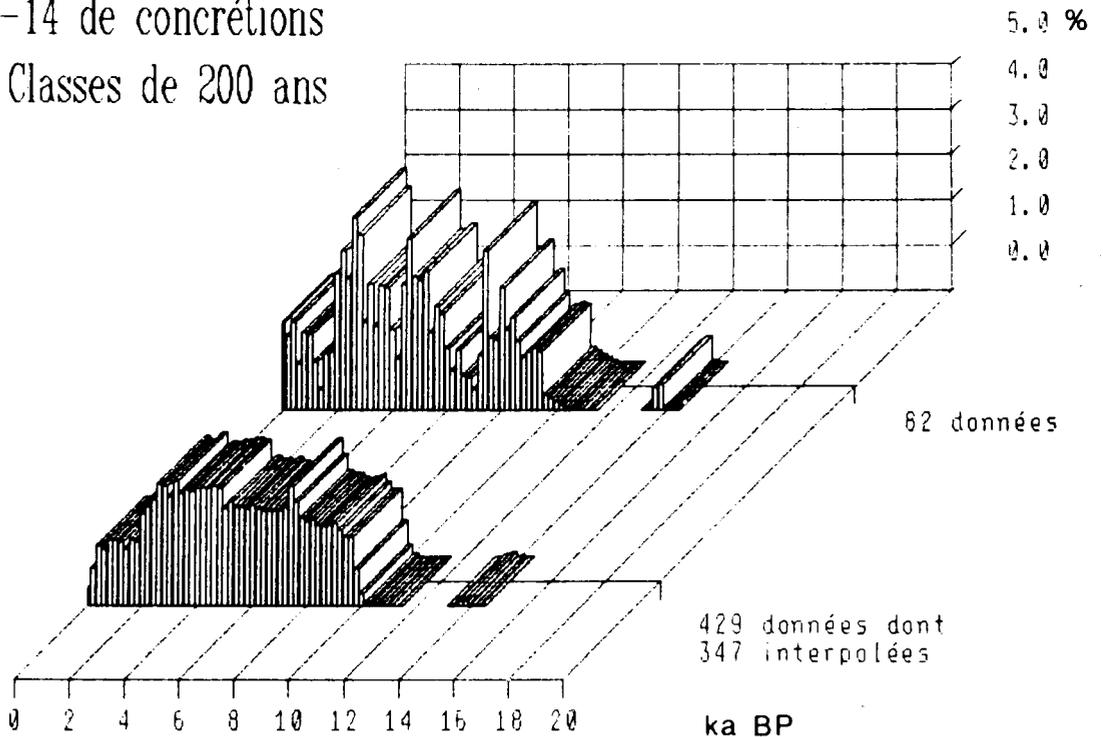


Fig. 2.- Distribution des âges ^{14}C de concrétions de grottes belges. La construction des histogrammes intègre les erreurs associées aux datations ^{14}C (corrigées pour une activité ^{14}C initiale = 85 % de carbone moderne).

A l'arrière-plan : données brutes, 82 datations ^{14}C . A l'avant-plan : 347 «âges» interpolés ont été ajoutés en tenant compte des vitesses de croissance des concrétions et des arrêts de croissance éventuels (Gewelt, 1988).

Geyh & Hennig (1986) publient 11 dates ^{14}C obtenues dans un plancher stalagmitique d'une grotte du NW de l'Allemagne. Les âges sont en bonne concordance générale avec les datations $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. Par un calcul de régression à partir des âges ^{14}C , ils déduisent que la correction à apporter aux âges ^{14}C conventionnels est de - 1700 ans, ce qui correspond à une activité ^{14}C initiale = 81 %. Le problème posé par l'estimation de l'activité ^{14}C initiale des concrétions est discuté par Gewelt (1986) et la même année, Bastin & Gewelt publient les résultats d'une étude comparative entre le ^{14}C et la palynologie, montrant que la correction des âges ^{14}C apparents des concrétions de grottes belges doit être voisine de - 1305 ans ($A_0 = 85\%$) durant l'Holocène.

B.- DATATION PAR $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$

Les déséquilibres isotopiques dans les familles de l'uranium n'ont été utilisés, pour dater les concrétions de grottes, que bien après le ^{14}C . Leur usage à cette fin a débuté dans les années soixante avec les travaux de Rosholt & Antal (1962), Cherdynstev *et al.* (1965) et Komura & Sakanoue (1967).

Mais les travaux des pionniers furent consacrés à la difficile recherche des isotopes adéquats à une estimation d'âge, et divers rapports isotopiques

furent essayés. En 1969, Nguyen & Lalou étudient le rapport $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dans plusieurs échantillons d'eaux souterraines, s'en servent pour critiquer les travaux de Fornaca-Rinaldi (1968) et publient sur la base du rapport $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ trois datations dans une stalagmite de l'Aven d'Ornac (Ardèche, France). Duplessy *et al.* (1970) ajoutent deux datations dans la même concrétion, et commentent les $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ mesurés dans les mêmes échantillons. La même année, les premiers résultats de la McMaster University sont publiés (Thompson, 1970).

Dès ce moment, les publications commencent à foisonner. Et, si nous répertorions de 1971 à 1982 vingt-cinq travaux publiés sur les datations de concrétions par ^{14}C , nous en inventorions sur la même période plus de cent consacrés aux datations par $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$! Faute de place, nous n'en citerons que quelques jalons.

On ne peut omettre, par exemple, le travail de Harmon *et al.* (1977), recueil de 54 datations de concrétions des Rocheuses et des Monts Mackenzie, présentées en termes de variations climatiques (glaciaires/interglaciaires). Un peu plus tard, Atkinson *et al.* (1978) présentent 28 dates dans des concrétions de grottes anglaises. Des périodes de concrétionnement s'avèrent ici encore séparées par des périodes d'inactivité. En 1979, Schwarcz discute de la correction des âges $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ des échantillons contaminés par des sédiments détritiques.

Il faut citer aussi les 27 datations de Gascoyne *et al.* (1981) dans l'île de Vancouver ; les $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ mesurés enrichissent le travail. Mais plus encore le travail de Gascoyne & Schwarcz (1982), revue des datations de concrétions stalagmitiques par des mesures de rapports isotopiques de divers membres des familles de l'uranium, accompagnée d'une étude comparative de deux méthodes appliquées à 14 échantillons. Gascoyne *et al.* (1983 a) présentent et discutent les 183 datations de concrétions anglaises de la thèse de Gascoyne (1980) et comparent leur distribution à celle des concrétions des Rocheuses et des Monts Mackenzie.

Lively (1983) observe que les données climatiques régionales ou locales, particulièrement aux marges glaciaires, peuvent oblitérer les influences du climat moyen général.

Hennig *et al.* (1983) collationnent 664 datations ($^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ et $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$) de concrétions développées dans les régions I et II de Troll (1964). La répartition des âges est comparée aux enregistrements des $\delta^{18}\text{O}$ des fonds océaniques : la corrélation

de l'intensité du concrétionnement avec le climat est établie. Cependant, la méthode de calcul de la courbe des fréquences utilisée par les auteurs ne fait pas apparaître les phases de concrétionnement en relation avec les stades isotopiques 1 et 3. Aussi, nous avons dressé une nouvelle courbe de fréquence (fig. 3) en reprenant les 482 dates rassemblées par Hennig *et al.* (1983) pour les concrétions de la région I et en y ajoutant les datations comprises entre 0,5 et 350 ka publiées par Latham *et al.* (1979), Debenath *et al.* (1980), Lauritzen & Gascoyne (1980), Gascoyne *et al.* (1981), Keen *et al.* (1981), Latham *et al.* (1982), Lauritzen & Saint-Pierre (1982), Williams (1982), Blackwell *et al.* (1983), Ford *et al.* (1983), Gascoyne & Nelson (1983), Gascoyne *et al.* (1983 a et c), Goede & Harmon (1983), Lively (1983), Bakalowicz *et al.* (1984), Gewalt *et al.* (1984), Quinif & Dupuis (1984), Gewalt (1985), Sutcliffe *et al.* (1985), Atkinson *et al.* (1986), Bastin & Gewalt (1986), Cantillana *et al.* (1986), Gewalt & Juvigné (1986) et Gewalt (1987).

U-series dates from Zone I speleothems

857 U-SERIES AGES

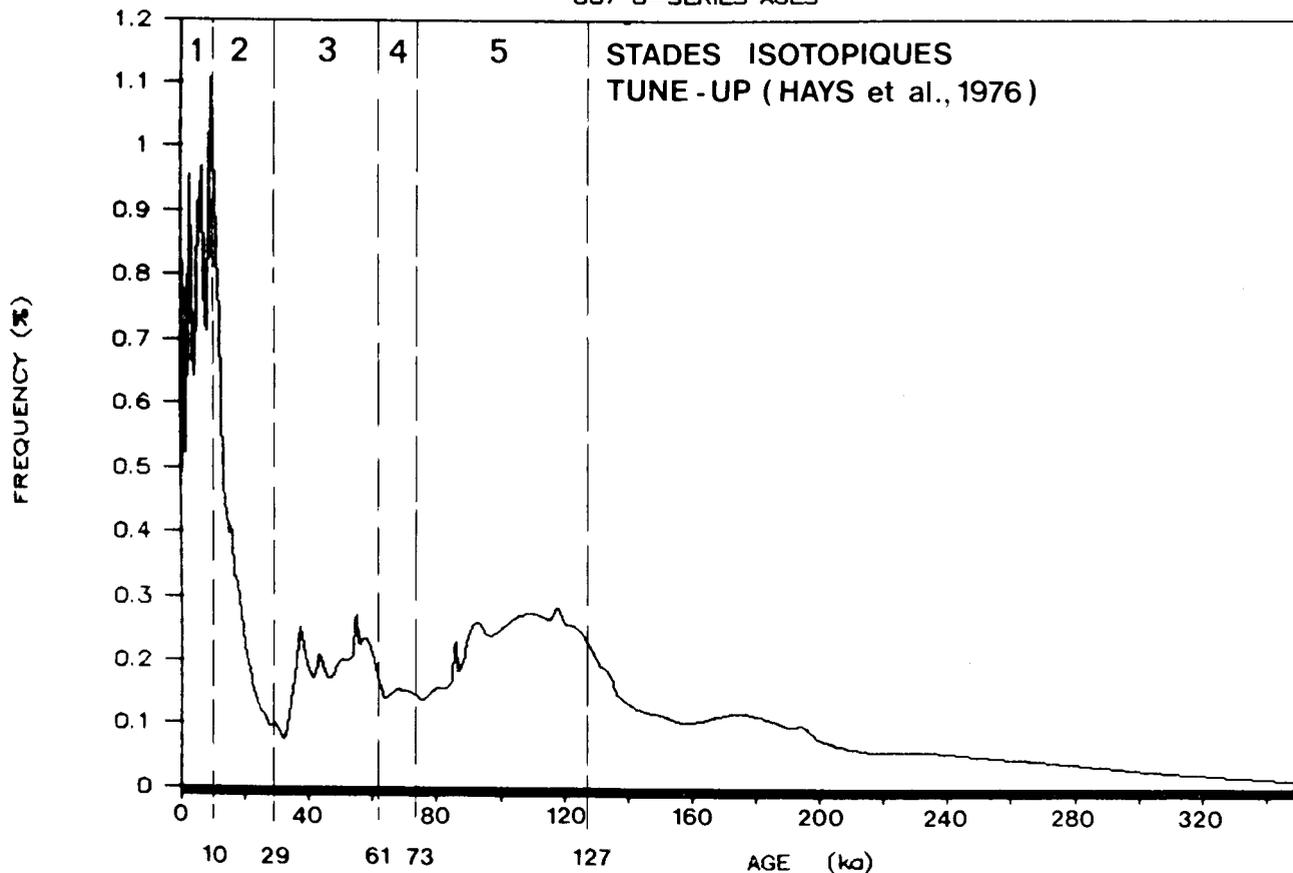


Fig. 3.- Courbe des fréquences des âges $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ de concrétions stalagmitiques provenant de grottes situées dans la zone climatique I de Troll (1964). La construction de la courbe est basée sur la fonction de densité de probabilité d'une distribution normale et elle intègre les erreurs associées à chaque date. 857 datations uranium-thorium ont été utilisées (références : voir texte).

Au total, ce sont maintenant 857 datations de concrétions développées dans la zone I de Troll, 1964 (qui correspond approximativement aux anciennes régions glaciaires et périglaciaires comme, par exemple, le nord et le centre de l'Europe, le Canada et le nord des Etats-Unis) qui ont été utilisées pour dresser la figure 3 (1). Le calcul de fréquence utilise un programme original basé sur la densité de probabilité (loi normale) de chaque date, en tenant compte de l'erreur associée à chaque datation. On a utilisé le même intervalle de classe de 500 ans que celui choisi par Hennig *et al.* (1983). Les détails concernant la construction des courbes de fréquence sont donnés dans Gewelt (1988). La méthode utilisée est assez proche de celle décrite par Gordon & Smart (1984).

Notre traitement statistique associé aux nouvelles données permet maintenant de reconnaître que le

maximum postglaciaire (stade isotopique 1) et le stade isotopique 3 sont également des périodes de concrétionnement actif, ce que n'indiquait pas le traitement statistique utilisé par Hennig *et al.* (1983).

La courbe des fréquences introduit un lissage de l'histogramme brut (fig. 3) qui est d'autant plus important que l'erreur associée aux datations est élevée. Comme l'erreur est plus grande pour les âges anciens, les maxima > 150 ka n'apparaissent que comme une légère bosse de la courbe des fréquences.

L'étude de la répartition du concrétionnement à l'échelle locale des grottes belges (Gewelt, 1985 et 1988) montre les mêmes caractéristiques générales (fig. 4). Cependant, durant le maximum du froid de la dernière glaciation, le concrétionnement s'est réduit de façon drastique, probablement suite à l'installation d'un pergélisol continu.

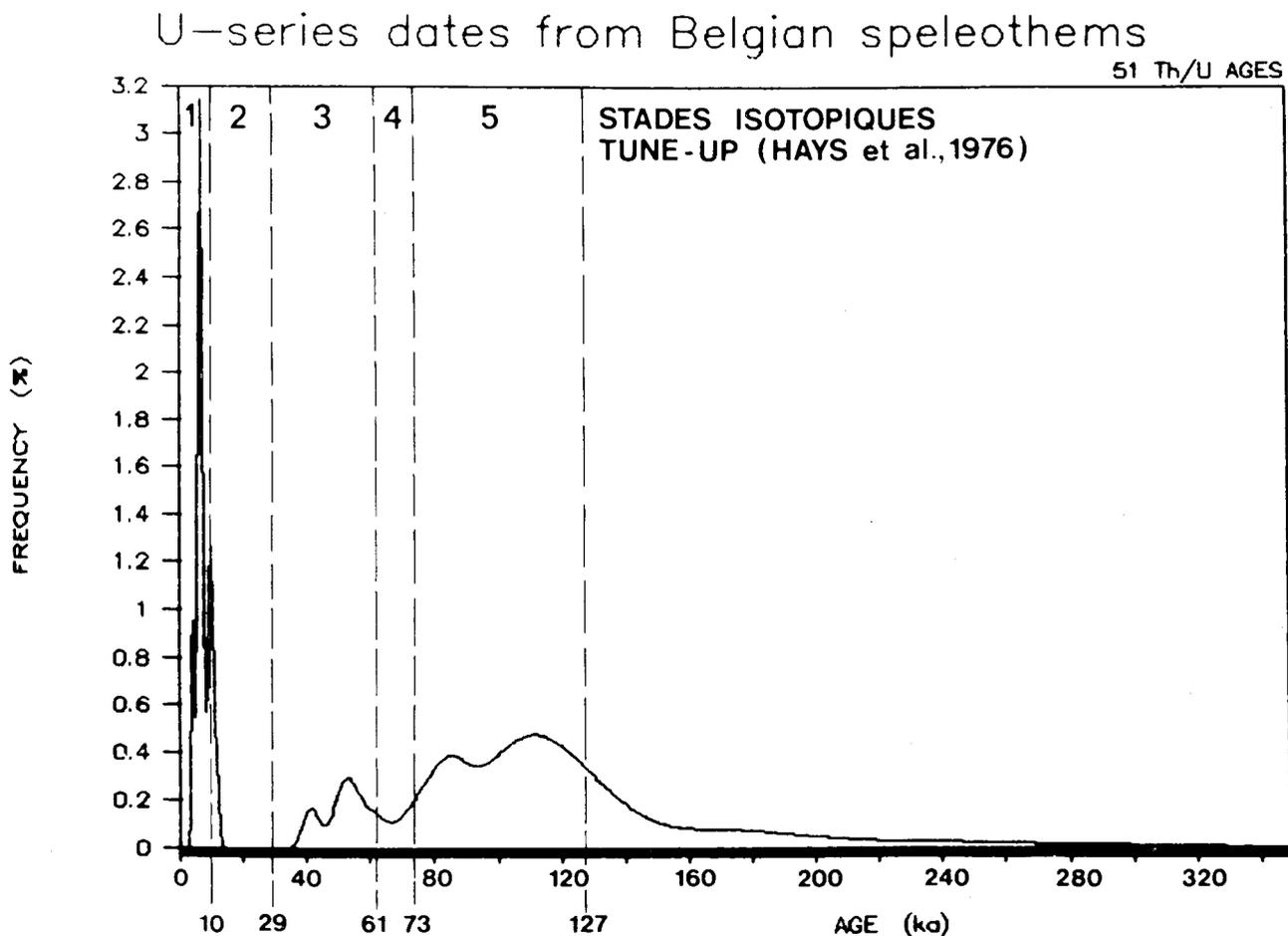


Fig. 4.- Courbe des fréquences des âges $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ de concrétions stalagmitiques de grottes belges.

51 datations de Gewelt (1985 et résultats inédits). Même construction que la fig. 3.

(1) Les données publiées par Gascoyne (1981) n'ont pas été reprises, afin d'éviter un double emploi avec la liste complète de Gascoyne *et al.*, 1983 a. De même, seules les nouvelles données publiées par Lively (1983) ont été ajoutées à celles de Lively *et al.* (1981). Les 5 âges obtenus par Delannoy *et al.* (1986) sur des concrétions de gouffres de moyenne montagne dans l'Isère n'ont pas été utilisés pour la construction de la courbe des fréquences car ils sont publiés sans les erreurs associées. Les dates présentées lors du 9e Congrès international de Spéléologie à Barcelone (1986) n'ont pas été reprises.

La datation de planchers stalagmitiques associés à une faune à *Gulo gulo* permet à Sutcliffe *et al.* (1985) de conclure qu'une détérioration climatique s'est produite en Angleterre entre 120 et 83 ka.

Les âges $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ de 26 concrétions de 3 régions de Grande Bretagne permettent à Atkinson *et al.* (1986) de montrer que le concrétionnement était ralenti entre 40 et 26 ka, absent entre 24 et 15 ka et abondant depuis 15 ka jusqu'à aujourd'hui.

A côté des aspects paléoclimatiques, la datation des concrétions possède également des implications géomorphologiques. Elle permet de déduire l'âge minimum de la grotte dans laquelle la concrétion datée s'est développée, et d'établir l'âge minimum de l'établissement de conditions vadoses, les stalagmites ne pouvant pas se développer sous l'eau. A partir de l'âge des concrétions, on peut aussi calculer le taux maximum d'érosion en surface (enfouissement du réseau hydrographique). Ainsi, Atkinson *et al.* (1978) ont étudié le développement des grottes des Mendip Hills et Gascoyne (1980) a étudié celui des grottes du Lancashire. Ford, en 1985, a rassemblé diverses données obtenues à la McMaster University ; les valeurs maximales d'enfoncement pour divers types de karsts sont comprises entre 11 et 2 cm/1 000 ans et même parfois nulles ! En Belgique, les datations réalisées dans l'étage supérieur de la grotte de Remouchamps (Gewelt, 1985 et 1988) conduisent à un taux maximal d'enfoncement du réseau hydrographique de 79 Bubnoff (mm/1 000 ans), valeur calculée sur 127 ka. Dans la grotte de la Fontaine de Rivière, la datation d'un bourrelet de calcite marquant l'altitude d'un paléoniveau du lac souterrain (+ 9,75 m) permet de calculer une vitesse d'enfoncement maximale de 44 Bubnoff (calculée sur 221 ka). Cette valeur est probablement plus fiable car elle est calculée à partir des datations d'un bourrelet de calcite contemporain du niveau piézométrique + 10 m. Les données présentées ici pour la Belgique sont comparables à celles trouvées par Gascoyne *et al.* (1983 b) dans le nord des Pennines et par Rowe *et al.* (1988) dans la partie méridionale du même massif.

C.- AUTRES METHODES DE DATATION

Outre les datations par ^{14}C et par $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, d'autres descendants des familles de l'uranium ont été plus rarement utilisés comme, par exemple, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (Thompson *et al.*, 1975) et, pour les concrétions riches en uranium, $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ et $^{227}\text{Th}/^{230}\text{Th}$ (Gascoyne, 1977 b ; Gascoyne & Schwarcz, 1982).

D'autres méthodes de datation ont aussi été essayées avec des succès variables sur les concrétions : la thermoluminescence (Wintle, 1978), le paléomagnétisme (Latham, 1977 et 1981 ; Latham *et al.*, 1986), la résonance paramagnétique électronique (Ikeya, 1975 ; Hennig & Grün, 1983 ; Grün, 1985 ; Smith *et al.*, 1985) et les mesures par spectrométrie gamma (Quinif, 1980).

V.- LES ISOTOPES STABLES

L'étude des variations du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ permet, dans certaines conditions (dépôt à l'équilibre isotopique de l'oxygène), de mettre en évidence les changements climatiques intervenus durant la croissance des concrétions stalagmitiques. Les premières études ont été développées par Fornaca-Rinaldi *et al.* (1968), Hendy & Wilson (1968), Fantidis & Ehhalt (1970), Hendy (1971). De nombreuses applications régionales ont suivi (par exemple, Duplessy *et al.*, 1970 ; Talma *et al.*, 1974 ; Harmon *et al.*, 1978 a et b, 1979 ; Harmon & Schwarcz, 1981 ; Gewalt, 1981 et 1988). Le problème de la conversion des $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite en termes de paléotempératures implique la connaissance du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau à partir de laquelle s'est formée la concrétion. Schwarcz *et al.* (1976) parviennent à le résoudre partiellement en estimant le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau à partir de la mesure du δD de l'eau piégée dans les inclusions de la calcite. Quant à la signification des variations du $\delta^{13}\text{C}$, les interprétations sont encore délicates. L'influence de l'activité végétale est certaine mais d'autres processus, comme la dissolution incongruente de la dolomite peuvent influencer fortement le $\delta^{13}\text{C}$ des concrétions (Wigley *et al.*, 1978).

VI.- AUTRES METHODES D'ETUDE

L'analyse pollinique des planchers stalagmitiques a débuté par les travaux de Leroi-Gourhan (1967), Damblon (1974) et Bastin (1976). Depuis son application aux stalagmites (Bastin, 1978 et 1982) elle a pris un essor considérable et s'avère très utile à la reconstruction paléoclimatique. Bastin & Gewalt (1986) ont ainsi établi une succession des associations végétales couvrant la totalité de l'Holocène. Dans ce travail, une très bonne concordance entre les résultats de la palynologie et de la datation ^{14}C des concrétions est obtenue.

Très récemment, des minéraux volcaniques ont été découverts dans des concrétions stalagmitiques datées par $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ (Gewelt & Juvigné, 1986). Cette découverte ouvre des possibilités nouvelles à la téphrostratigraphie.

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. G. Koch et le personnel de la Section «Mesures des faibles Radioactivités» du CEN/SCK pour leur aide dans les laboratoires ^{14}C et U-Th, ainsi que M. B. Bastin pour le soin avec lequel il a relu notre manuscrit. Les programmes statistiques ont été réalisés avec les conseils de MM. M. Erpicum, G. Mabillet et C. Hurtgen.

BIBLIOGRAPHIE

- ATKINSON, T.C., 1983.- Growth mechanisms of speleothems in Castle-guard Cave, Alberta, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 15 : 523-536.
- ATKINSON, T.C., HARMON, R.S., SMART, P.L. & WALTHAM, A.C., 1978.- Paleoclimatic and geomorphic implications of $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dates on speleothems from Britain. *Nature*, 272 : 24-28.
- ATKINSON, T.C., LAWSON, T.J., SMART, P.L., HARMON, R.S. & HESS, J.W., 1986.- New data of speleothem deposition and palaeoclimate in Britain over the last forty thousand years. *Journ. of Quaternary Sc.*, 1 (1) : 67-72.
- BAKALOWICZ, M., SORRIAUX, P. & FORD, D.C., 1984.- Quaternary glacial events in the Pyrénées, from U-series dating of the Niaux-Lombrives-Sabart caves, Ariège, France. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 38 : 193-197.
- BASTIN, B., 1976.- Etude palynologique des couches E2, D et B^S de la grotte de Fontéchevade (Charente, France). *Bull. Soc. roy. belge Anthropol. Préhist.*, 87 : 15-27.
- BASTIN, B., 1978.- L'analyse pollinique des stalagmites : une nouvelle possibilité d'approche des fluctuations climatiques du Quaternaire. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 101 : 13-19.
- BASTIN, B., 1982.- Premier bilan de l'analyse pollinique de stalagmites holocènes en provenance de grottes belges. *Revue belge de Géographie*, 106 (1) : 87-97.
- BASTIN, B. & GEWELT, M., 1986.- Analyse pollinique et datation ^{14}C de concrétions stalagmitiques holocènes : apports complémentaires des deux méthodes. *Géogr. phys. et Quaternaire*, 40 (2) : 185-196.
- BLACKWELL, B., SCHWARCZ, H.P. & DEBENATH, A., 1983.- Absolute dating of hominids and Palaeolithic artifacts of the cave of La Chaise-de-Vouthon (Charente), France. *Journ. of Archaeol. Sc.*, 10 : 493-513.
- BLEAHU, M., 1982.- *Relieful carstic*. Albatros, Bucarest, 296 p.
- BÖGLI, A., 1980.- *Karst hydrology and physical speleology*. Springer Verlag, Berlin, 284 p.
- BROUGHTON, P.L., 1983a.- Lattice deformation and curvation in stalactitic carbonate. *Int. Journal of Speleology*, 13 (1-4) : 19-30.
- BROUGHTON, P.L., 1983b.- Environmental implications of competitive growth fabrics in stalactitic carbonate. *Int. Journal of Speleology*, 13 (1-4) : 31-42.
- BROUGHTON, P.L., 1983c.- Secondary origin of the radial fabric in stalactitic carbonate. *Int. Journal of Speleology*, 13 (1-4) : 43-66.
- CANTILLANA, R., QUINIF, Y. & MAIRE, R., 1986.- Uranium-thorium dating of stalagmites applied to study the Quaternary of the Pyrénées (France) : The example of the «Gouffre de la Pierre-Saint-Martin». *Chemical Geology*, 57 : 137-144.
- CHERDYNTSEV, V.V., KAZACHEVSKY, I.V. & KUZMINA, Y.A., 1965.- Dating of pleistocene carbonates formations by the thorium and uranium isotopes. *Geochemistry Int.*, 2 : 794-801.
- CURL, R.L., 1972.- Minimum diameter stalactites. *National Speleological Society Bulletin*, 34 : 129-136.
- CURL, R.L., 1973.- Minimum diameter stalagmites. *National Speleological Society Bulletin*, 35 : 1-9.
- DAMBLON, F., 1974.- Observations palynologiques dans la Grotte de Remouchamps. *Bull. Soc. roy. belge Anthropol. Préhist.*, 85 : 131-155.
- DEBENATH, A., RAYNAL, J.P. & SCHWARCZ, H.P., 1980.- Remarques sur l'édification des planchers stalagmitiques quaternaires. In : *Cristallisation - Déformation - Dissolution des carbonates*, Bordeaux, 17-18 nov. 1980, Univ. de Bordeaux III : 149-161.
- DELANNOY, J.J., HOLLIGER, P., AUBERT, C., HAFFNER, D., KRATTINGER, T., & POMOT, C., 1986.- Les apports du chronomètre géologique ^{234}U - ^{230}Th dans la karstologie de la Grande Moucherolle - Rochers de la Balme (Vercors). *Karstologia*, 7 : 11-20.
- DREYBRODT, W., 1981.- The kinetics of calcite precipitation from thin films of calcareous solutions and the growth of speleothems : revisited. *Chemical Geology*, 32 : 237-245.
- DREYBRODT, W., 1982.- A possible mechanism for growth of calcite speleothems without participation of biogenic carbon dioxide. *Earth and Planetary Science Letters*, 58 : 293-299.
- DUPLESSY, J.C., LABEYRIE, J., LALOU, C. & NGUYEN, H.V., 1970.- Continental climatic variations between 130,000 and 90,000 Years B.P., *Nature*, 226 : 631-633.
- EK, C., 1973.- La dissolution du carbonate de calcium. Essai de mise au point. *Bull. Soc. géogr. Liège*, 9 : 55-87.
- EK, C., 1986.- Les remplissages des grottes. Concrétions et dépôts détritiques. Aperçu synthétique. *Jornadas sobre el Karst en Euskadi*. San Sebastian, 1986 : 77-104.
- EK, C. & GEWELT, M., 1985.- Carbon dioxide in cave atmospheres. New results in Belgium and comparison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10 : 173-187.
- EK, C. & GEWELT, M., 1986.- Composition cationique de trois concrétions colorées de la grotte de Ramioul (Belgique). *Bull. Chérch. Wallonie*, 27 : 37-47.
- EK, C. & ROQUES, H., 1972.- Dissolution expérimentale de calcaires dans une solution de gaz carbonique. Note préliminaire. *Transactions of the Cave Research Group of Great Britain*, 14 : 67-82.
- FANTIDIS, J. & EHHALT, D.H., 1970.- Variations of the carbon and oxygen isotopic composition in stalagmites and stalactites : evidence of non-equilibrium isotopic fractionation. *Earth and Planetary Science Letters*, 10 : 136-144.
- FOLK, R.L. & ASSERETO, R., 1976.- Comparative fabrics of length-slow and length-fast calcite and calcitized aragonite in a holocene speleothem, Carlsbad Caverns, New Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology*, 46 : 486-496.
- FORD, D.C., 1985.- Dynamics of the karst system : a review of some recent works in North America. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 108 : 283-291.
- FORD, T.D. & CULLINGFORD, C.H.D., 1976.- *The Science of Speleology*. Academic Press, London, 593 p.
- FORD, T.D., GASCOYNE, M. & BECK, J.S., 1983.- Speleothem dates and Pleistocene chronology in the Peak District of Derbyshire. *Trans. British Cave Res. Assoc.*, 10 (2) : 103-115.
- FORNACA-RINALDI, G., 1968.- $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dating of cave concretions. *Earth and Planetary Science Letters*, 5 : 120-122.
- FORNACA-RINALDI, G., PANICHI, C. & TONGIORGI E., 1968.- Some causes of the variation of the isotopic composition of carbon and oxygen in cave concretions. *Earth and Planetary Science Letters*, 4 : 321-324.
- FRANKE, H.W., 1965.- The theory behind stalagmite shapes. *Studies in Speleology*, 1 : 89-95.
- FRANKE, H.W., 1966.- Ein speleochronologischen Beitrag zur postglazialen Klimageschichte. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 17 : 149-152.
- FRANKE, H.W., 1967.- Isotopenhältnisse im sekundären Kalk — geochronologische Aspekte. *Atompraxis*, 13 (8) : 363-366.
- FRANKE, H.W., 1971.- Morphologie und Stratigraphie des Tropsteins. Rückschlüsse auf Grössen des Paläoklimas. *Geol. Jahrb.*, 89 : 473-501.
- GAMS, I., 1968.- Versuch einer Klassifikation der Tropsteinformen in der Grotte von Postojna. *Actes du IVe Congrès international de Spéléologie*, III : 117-126.
- GASCOYNE, M., 1977a.- Trace elements geochemistry of speleothems. *Proceedings 7th Int. Speleological Congress*. Sheffield, England, 1977, 205-208.
- GASCOYNE, M., 1977b.- *Uranium series dating of speleothem : an investigation of technique, data processing and precision*. Technical Memo., 77-4, Dept of Geology, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, 117 p.

- GASCOYNE, M., 1977c.- Trace elements in calcite. The only cause of speleothem color? *Proceed. of the 1977 NSS Annual Convention*, 39-42.
- GASCOYNE, M., 1980.- *Isotopic and geochronologic studies of speleothems*. Ph. D. thesis, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada.
- GASCOYNE, M., 1981.- A climate record of the Yorkshire Dales for the last 300,000 years. *Proceedings 8th Int. Congress of Speleology*, Bowling Green, Kentucky: 96-98.
- GASCOYNE, M., FORD, D.C. & SCHWARCZ, H.P., 1981.- Late Pleistocene chronology and paleoclimate of Vancouver Island determined from cave deposits. *Canadian Journal of Earth Science*, 18: 1643-1652.
- GASCOYNE *et al.*, 1983a: voir GASCOYNE, SCHWARCZ & FORD, 1983.
- GASCOYNE *et al.*, 1983b: voir GASCOYNE, FORD & SCHWARCZ, 1983.
- GASCOYNE *et al.*, 1983c: voir GASCOYNE, LATHAM, HARMON & FORD, 1983.
- GASCOYNE, M., FORD, D.C. & SCHWARCZ, H.P., 1983.- Rates of cave and landform development in the Yorkshire Dales from speleothem age data. *Earth Surf. Proc. and Landforms*, 8: 557-568.
- GASCOYNE, M., LATHAM, A.G., HARMON, R.S. & FORD, D.C., 1983.- The antiquity of Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 15: 463-470.
- GASCOYNE, M. & NELSON, D.E., 1983.- Growth mechanisms of recent speleothems from Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada, inferred from a comparison on uranium-series and carbon-14 age data. *Arctic and Alpine Research*, 15: 537-542.
- GASCOYNE, M. & SCHWARCZ, H.P., 1982.- Uranium series dating of speleothems. In: *Uranium series disequilibrium: applications to environmental problems*. M. Ivanovich and R.S. Harmon, Ed., Clarendon Press, Oxford: 270-287.
- GASCOYNE, M., SCHWARCZ, H.P. & FORD, D.C., 1983.- Uranium-series ages of speleothem from Northwest England: correlation with Quaternary climate. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, B301: 143-164.
- GEWELT, M., 1981.- Les variations isotopiques du carbone et de l'oxygène dans une stalagmite de la grotte de Remouchamps (Belgique). Méthodes et premiers résultats. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 104: 269-279.
- GEWELT, M., 1984.- Les datations radiométriques ^{14}C et $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. In: *Livret-guide des excursions, Colloque international de Karstologie appliquée*. Liège, Laboratoire de Géomorphologie de l'Université de Liège: 9-14 et 22-23.
- GEWELT, M., 1985.- Cinétique du concrétionnement dans quelques grottes belges: apport des datations ^{14}C et $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 108: 267-273.
- GEWELT, M., 1986.- Datations ^{14}C de concrétions de grottes belges: vitesses de croissance durant l'Holocène et implications paléoclimatiques. In: *New Directions in Karst*. Proceed. Anglo-French Karst Symposium, Oxford, Sept. 1983, K. Paterson & M. Sweeting, Ed., Geo Books, Norwich, 289-317.
- GEWELT, M., 1988.- Thèse de doctorat, Université de Liège (en préparation).
- GEWELT, M., GASCOYNE, M., QUINIF, Y. & CANTILLANA, R., 1984.- Les datations radiométriques. *Kölnner Geogr. Arb.*, 45: 95-104.
- GEWELT, M. & JUVIGNÉ, E., 1986.- Les «téphra de Remouchamps», un nouveau marqueur stratigraphique dans le Pléistocène supérieur daté par $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dans des concrétions stalagmitiques. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 109: 489-497.
- GEYH, M.A. & FRANKE, H.W., 1970.- Zur Wachstumsgeschwindigkeit von Stalagmiten. *Atompraxis*, 16 (1): 46-48.
- GEYH, M.A. & HENNIG, G.J., 1986.- Multiple dating of a long flowstone profile. *Radiocarbon*, 28 (2A): 503-509.
- GEYH, M.A. & SCHILLAT, B., 1966.- Messungen der Kohlenstoff. Isotopenhäufigkeit von Kalksinterproben aus der Langenfelder Höhle. *Der Aufschluss*, 12: 315-323.
- GIROU, A., 1970.- *Etude de la cinétique de la précipitation des carbonates de calcium*. Thèse de doctorat. Fac. Sc. Univ. Toulouse, 137 p.
- GOEDE, A. & HARMON, R.S., 1983.- Radiometric dating of Tasmanian speleothems. Evidence of cave evolution and climatic change. *J. Geol. Soc. of Australia*, 30 (1-2): 89-100.
- GORDON, D. & SMART, P.L., 1984.- Comments on «Speleothems, travertines, and paleoclimates» by G.J. Hennig, R. Grün and K. Brunnacker. *Quaternary Research*, 22: 144-147.
- GRÜN, R., 1985.- ESR dating speleothems: limits of the method. In: *ESR Dating and Dosimetry*, Ionics, Tokyo, 61-72.
- HARMON, R.S., FORD, D.C. & SCHWARCZ, H.P., 1977.- Interglacial chronology of the Rocky and Mackenzie Mountains based on $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dating of calcite speleothems. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14: 2543-2552.
- HARMON, R.S. & SCHWARCZ, H.P., 1981.- Changes of ^2H and ^{18}O enrichment of meteoric water and Pleistocene glaciation. *Nature*, 290: 125-128.
- HARMON *et al.*, 1978a: voir HARMON, SCHWARCZ & FORD, 1978.
- HARMON *et al.*, 1978b: voir HARMON, THOMPSON, SCHWARCZ & FORD, 1978.
- HARMON, R.S., SCHWARCZ, H.P. & FORD, D.C., 1978.- Stable isotope geochemistry of speleothems and cave waters from Flint Ridge — Mammoth cave system, Kentucky: implications for terrestrial climate change during the period 230,000 to 100,000 years B.P. *Journal of Geology*, 86: 373-384.
- HARMON, R.S., SCHWARCZ, H.P., FORD, D.C. & KOCH, D.L., 1979.- An isotopic paleotemperature record for late Wisconsin time in Northeast Iowa. *Geology*, 7: 405-409.
- HARMON, R.S., THOMPSON, P., SCHWARCZ, H.P. & FORD, D.C., 1978.- Late Pleistocene paleoclimates of North America as inferred from stable isotope studies of speleothems. *Quaternary Research*, 9: 54-70.
- HAYS, J.D., IMBRIE, J. & SHACKLETON, N.J., 1976.- Variations in the earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science*, 194: 1121-1132.
- HENDY, C.H., 1970.- The use of ^{14}C in the study of cave processes. In: *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*. I.U. Olsson (édit.). Proc. 12th Nobel Symp. Uppsala, 1969, 419-443.
- HENDY, C.H., 1971.- The isotopic geochemistry of speleothems. I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimatic indicators. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 35: 801-824.
- HENDY, C.H. & WILSON, A.T., 1968.- Paleoclimatic data from speleothems. *Nature*, 219: 48-51.
- HENNIG, G.J. & GRÜN, R., 1983.- ESR dating in Quaternary geology. *Quaternary Science Reviews*, 2: 157-238.
- HENNIG, G.J., GRÜN, R. & BRUNNACKER, K., 1983.- Speleothems, travertines and paleoclimates. *Quaternary Research*, 20: 1-29.
- HILL, C.A., 1976.- *Cave Minerals*. N.S.S., Huntsville, Alabama, 137 p.
- HILL, C.A. & FORTI, P., 1986.- *Cave minerals of the world*. N.S.S., Huntsville, Alabama, 238 p.
- IKEYA, M., 1975.- Dating a stalactite by electron paramagnetic resonance. *Nature*, 255: 48-50.
- JAKUCS, L., 1977.- *Morphogenetics of karst regions*. Hilger, Bristol, 284 p.
- JENNINGS, J.N., 1971.- *Karst*. M.I.T. Press, Cambridge, 252 p.
- JENNINGS, J.N., 1983.- The disregarded karst of the arid and semi-arid domain. *Karstologia*, 1: 61-73.
- KEEN, D.H., HARMON, R.S. & ANDREWS, J.T., 1981.- U-Series and amino acid dates from Jersey. *Nature*, 289: 162-164.
- KENDALL, A.C. & BROUGHTON, P.L., 1978.- Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals. *Journal of Sedimentary Petrology*, 48: 519-538.
- KOMURA, K. & SAKANOUÉ, M., 1967.- Studies on the dating methods for Quaternary samples by natural alpha-radioactive nuclides. *Sci. Rep. Kanazawa Univ.*, 12 (1): 21-66.
- LABEYRIE, J., DUPLESSY, J.C., DELIBRIAS, G. & LÉTOLLE, R., 1967.- Etude des températures des climats anciens par la mesure de l'oxygène 18, du carbone 13 et du carbone 14 dans les concrétions des cavernes. In: *Radioactive dating and method of low-level counting*, I.A.E.A., Vienne: 153-160.
- LATHAM, A.G., 1977.- A feasibility study of the palaeomagnetism of stalagmite deposits. *Proc. 7th Int. Speleological Congress*, Sheffield, England: 280-282.
- LATHAM, A.G., 1981.- Magnetostratigraphy from speleothems: establishment and applications. *Proc. 8th Int. Congress of Speleology*, Bowling Green, Kentucky: 358-361.
- LATHAM, A.G., SCHWARCZ, H.P. & FORD, D.C., 1986.- The paleomagnetism and U-Th dating of Mexican stalagmite, DAS2. *Earth and Planetary Science Letters*, 79: 195-207.

- LATHAM, A.G., SCHWARCZ, H.P., FORD, D.C. & PEARCE, G.W., 1979.- Paleomagnetism of stalagmite deposits. *Nature*, 280 : 383-385.
- LATHAM, A.G., SCHWARCZ, H.P., FORD, D.C. & PEARCE, G.W., 1982.- The paleomagnetism and U-Th dating of three Canadian speleothems : evidence for the westward drift, 5.4-2.1 ka B.P. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 19 : 1985-1995.
- LAURITZEN, S.E. & GASCOYNE, M., 1980.- The first radiometric dating of Norwegian stalagmites. Evidence of pre-Weichselian karst caves. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 34 : 77-82.
- LAURITZEN, S.E. & SAINT-PIERRE, S., 1982.- A stalagmite date from Sirijordgrotten, northern Norway. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 36 (2) : 115-116.
- LEROI-GOURHAN, Ar., 1967.- Pollens et datation de la Grotte de la Vache (Ariège). *Bull. Soc. Préhist. Ariège*, 22 : 115-127.
- LIVELY, R.S., 1983.- Late Quaternary U-series speleothem growth record from southeastern Minnesota. *Geology*, 11 : 259-262.
- LIVELY, R.S., ALEXANDER, E.C. & MILSKE, J., 1981.- A late Pleistocene chronologic record in Southeastern Minnesota. *Proc. 8th Int. Congress of Speleology*, Bowling Green, Kentucky : 623-626.
- MONROE, W.H., 1970.- *A glossary of Karst terminology*. U.S. Geological Survey, Water-Supply paper 1899-K, 26 p.
- MOORE, G.W., 1970.- Check list of cave minerals. *National Speleological Society News*, 28 : 9-10.
- NGUYEN, H.V. & LALOU, C., 1969.- Comportement géochimique des isotopes des familles de l'uranium et du thorium dans les concrétionnements : application à la datation des stalagmites. *C.R. Acad. Sc. Paris, sér. D.*, 269 : 560-563.
- QUINIF, Y., 1980.- Etude du contenu en radioéléments du plancher stalagmitique supérieur. In : Le paléokarst de la Belle-Roche (Sprimont - Liège). Compte rendu de la réunion du 7.10.1980 (ULg). Publication officielle du F.N.R.S.- Groupe de contact : Etudes karstologiques (C.B.E.K.) : 129-131.
- QUINIF, Y. & DUPUIS, C., 1984.- Séquences sédimentaires souterraines. *Köln Geogr. Arb.*, 45 : 59-68.
- QUINLAN, J.F. & TRAVERSE, A., 1967.- Humic acid and humate deposits in Salts Cave and Mammoth Cave, Kentucky : a preliminary report. Abstract. *National Speleological Society Bulletin*, 29 : 98-99.
- ROQUES, H., 1967.- Chimie des carbonates et hydrogéologie karstique. *Mémoires et Documents du Centre de Recherches et de Documentation cartographiques*, C.N.R.S., 4 : 113-141.
- ROSHOLT, J.N. & ANTAL, P.S., 1962.- Evaluation of the Pa-231/U - Th-230/U method for dating Pleistocene carbonate rocks. *Geological Survey Res. 1962*, U.S. Geological Survey, Professional Paper, 450-E : E108-E111.
- ROWE, P., AUSTIN, T. & ATKINSON, T.C., 1988.- The Quaternary evolution of the British Southern Pennines from uranium series and palaeomagnetic data. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 111 (1) : 97-106.
- SCHWARCZ, H.P., 1979.- *Uranium-series dating of contaminated travertines : a two-component model*. McMaster University, Hamilton, Ontario, Tech-Memo, 79 (1) : 15 p.
- SCHWARCZ, H.P., HARMON, R.S., THOMPSON, P. & FORD, D.C., 1976.- Stable isotope studies of fluid inclusions in speleothems and their paleoclimatic significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40 : 657-665.
- SMITH, B.W., SMART, P.L., SYMONS, M.C.R. & ANDREWS, J.N., 1985.- ESR dating of detritally contaminated calcites, in : *ESR Dating and Dosimetry*, Ionics, Tokyo : 49-59.
- Suess, H., 1970.- Bristlecone-pine calibration of the radiocarbon time-scale 5200 BC to the present. In : Radiocarbon variations and absolute chronology, I.U. Olsson ed., John Wiley & Sons, New York : 303-311.
- SUTCLIFFE, A.J., LORD, T.C., HARMON, R.S., IVANOVICH, M., RAE, A.M. & HESS, J.W., 1985.- Wolverine in Northern England at about 83,000 years B.P. : faunal evidence for climate change during isotope stage 5. *Quaternary Research*, 24 : 73-86.
- SWEETING, M.M., 1972.- *Karst Landforms*. MacMillan, London, 362 p.
- TALMA, A.S., VOGEL, J.C. & PARTRIDGE, T.C., 1974.- Isotopic contents of some Transvaal speleothems and their paleoclimatic significance. *South African Journal of Science*, 70 : 135-140.
- THOMPSON, P., 1970.- A method for absolute age determinations of speleothems. Part I. *Canadian Caver*, 3 : 8-18.
- THOMPSON, G.M., LUMSDEN, D.N., WALKER, R.L. & CARTER, J.A., 1975.- Uranium series dating of stalagmites from Blanchard Springs Caverns, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39 : 1211-1218.
- THRAILKILL, J., 1970.- *Solution geochemistry of the waters of limestone terrains*. University of Kentucky, Water Resources Institute, Lexington, KY Research report n° 19, 125 p.
- TROLL, C., 1964.- Karte der Jahreszeiten-Klimate der Erde. *Erdkunde*, 18 : 5-28.
- VOGEL, J.C., 1983.- ¹⁴C variations during the upper Pleistocene. *Radiocarbon*, 25 (2) : 213-218.
- WHITE, W.B., 1980.- Reflectance spectra and color in speleothems (Abstract). *National Speleological Society Bulletin*, 42 : 32.
- WHITE, W.B., 1981.- Reflectance spectra and color in speleothems. *National Speleological Society Bulletin*, 43 : 20-26.
- WHITE, W.B., SCHEETZ, B.E., ATKINSON, S.D., IBBERTSON, D. & CHESSE, C.A., 1985.- Mineralogy of Rohrer's Cave, Pennsylvania. *National Speleological Society Bulletin*, 47 : 17-27.
- WIGLEY, T.M.L., PLUMMER, L.N. & PEARSON, F.J., 1978.- Mass transfer and carbon isotope evolution in natural water systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42 : 1117-1139.
- WILLIAMS, P.W., 1982.- Speleothem dates, Quaternary terraces and uplift rates in New-Zealand. *Nature*, 298 : 257-260.
- WINTLE, A.G., 1978.- A thermoluminescence dating study of some Quaternary calcite : potential and problems. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15 : 1977-1986.